

Performances agronomiques et environnementales de la méthanisation agricole sans élevage

La méthanisation agricole connaît un développement marqué en France depuis une vingtaine d'années. Si elle est fréquemment associée à l'élevage, dont elle valorise les effluents, une méthanisation agricole sans élevage se développe aussi, en particulier en Île-de-France. Ses impacts agronomiques et environnementaux demeurent mal connus. Dans ce contexte, la Direction régionale et interdépartementale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt (DRIAAF) d'Île-de-France a commandé une étude visant à modéliser ces impacts à l'échelle des parcelles et des exploitations agricoles. Cette note présente les principaux résultats de ce travail, réalisé par AgroParisTech et Inrae¹.

A lors que la méthanisation agricole a longtemps été perçue comme le moyen de valoriser les effluents d'élevage, elle connaît dorénavant un développement marqué dans les régions de grandes cultures, dont l'Île-de-France. Dans ces zones, elle est souvent associée à des exploitations sans productions animales, et se caractérise par le recours à des Cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE), pour l'alimentation des digesteurs, complétées de co-produits agricoles ou agro-industriels, de biodéchets alimentaires ou de cultures dédiées. Elle induit des changements dans les systèmes de production agricoles associés, mais peu d'études ont été menées sur les conséquences agronomiques et environnementales de ces évolutions.

Dans ce contexte, la Direction régionale et interdépartementale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt (DRIAAF) d'Île-de-France a commandé une étude visant à caractériser, dans le cadre francilien, les performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture associés aux méthaniseurs fonctionnant sans effluents d'élevage. Il s'agissait aussi de déterminer les conditions d'un développement durable de la méthanisation agricole dans cette région, et d'identifier les manques de connaissances en la matière.

Cette étude, réalisée par AgroParisTech et Inrae, s'est appuyée sur une revue de la littérature scientifique et technique et sur des entretiens avec des agriculteurs franciliens

disposant d'une unité de méthanisation en fonctionnement, non associée à une activité d'élevage. Elle a aussi comporté une analyse physico-chimique de digestats issus de ces méthaniseurs, et une modélisation des impacts agronomiques et environnementaux de la méthanisation à l'échelle de la parcelle et du système global d'exploitation. Elle a abouti à la formulation de recommandations pour le développement de la méthanisation sans élevage, et de préconisations de recherche complémentaires.

Sur la base des enquêtes réalisées, la première partie de cette note présente les caractéristiques des systèmes de culture et des exploitations associées à la méthanisation agricole sans élevage en Île-de-France. La deuxième décrit les propriétés des digestats issus de ces méthaniseurs. Enfin, une dernière partie expose les principaux résultats d'un travail de modélisation des impacts agronomiques et environnementaux de cette méthanisation agricole sans élevage.

1 - Des exploitations agricoles aux caractéristiques et dynamiques semblables

Les enquêtes réalisées auprès des agriculteurs associés aux onze unités de méthanisation sans élevage d'Île-de-France montrent leur grande homogénéité en matière de systèmes de production agricoles, de dynamiques d'évolution, de conduite des CIVE et de gestion des digestats.

Les agriculteurs rencontrés produisent tous des grandes cultures (blé, maïs, orge d'hiver, betterave, colza), et pour certains de la pomme de terre ou des légumes d'industrie. Tous sont en agriculture conventionnelle et certains se réclament de l'agriculture de conservation. Les structures sont pour la plupart comprises entre 250 et 350 hectares. Les méthaniseurs ont été mis en fonctionnement entre 2014 et 2020 et produisent de 140 à 300 Nm³/h² de biogaz injecté.

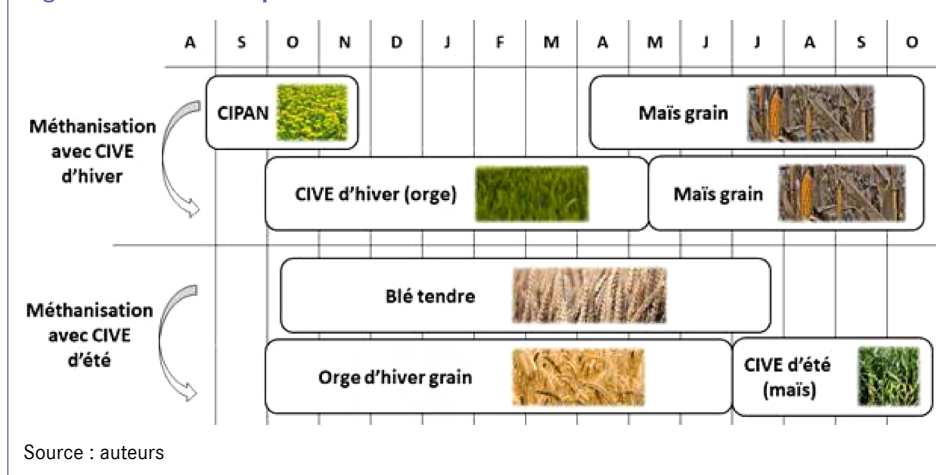
Sur ces exploitations, la méthanisation entraîne souvent une modification de l'assolement, avec l'introduction³ de CIVE d'hiver et d'été dans les rotations (figure 1). On observe généralement un accroissement de la sole en orge d'hiver, et parfois l'introduction de pois d'hiver, au

1. Carton S., Levavasseur F., 2022, *Performances agronomiques et environnementales de la méthanisation agricole dans un contexte de grandes cultures céréalières (sans élevage) et recommandations de bonnes pratiques*, AgroParisTech Inrae, rapport pour le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire : <https://agriculture.gouv.fr/performances-agronomiques-et-environnementales-de-la-methanisation-agricole-dans-un-contexte-de>

2. Le normo mètre cube (Nm³) est une unité de mesure de quantité de gaz, qui correspond au contenu d'un volume d'un mètre cube, pour un gaz se trouvant dans les conditions normales de température et de pression.

3. L'agriculture de conservation repose sur une forte réduction voire une suppression du travail des sols, leur couverture permanente et des successions culturales diversifiées. Pour plus de précisions voir : Schaller N., 2013, *L'agriculture de conservation*, CEP, Analyse n° 61 : <https://agriculture.gouv.fr/lagriculture-de-conservation-analyse-ndeg61>

Figure 1 - Deux exemples d'insertion de CIVE



détriment des soles habituelles de blé et de colza. Récoltés plus précocement que le blé, l'orge d'hiver et le pois d'hiver sont de bons précédents pour une CIVE d'été. S'agissant du colza, la baisse de la sole est souvent multifactorielle et pas uniquement le fait de la méthanisation (pression des ravageurs de cultures, conditions du marché). La méthanisation peut également provoquer une augmentation de la sole en maïs grain, cette culture pouvant être semée après une CIVE d'hiver. Cette dernière remplace alors une partie des Cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN), qui sont des couverts semés entre deux cultures principales pour capturer l'azote non utilisé et éviter sa lixiviation (moutarde, radis, phacélie, etc.).

Les CIVE sont cultivées chaque année sur 20 à 75 % de la surface agricole utilisée (SAU) des exploitations enquêtées. Il est fréquent que plusieurs exploitations alimentent une même unité de méthanisation, si bien qu'au total ce sont 55 à 450 hectares par méthaniseur qui sont consacrés à la culture de CIVE, lesquelles assurent 16 à 70 % de la ration. Il s'agit majoritairement d'orge d'hiver (CIVE d'hiver) et de maïs (CIVE d'été), tous deux ensilés en plante entière. Les agriculteurs testent également du seigle ou des mélanges légumineuses-céréales comme CIVE d'hiver, ainsi que du tournesol ou du sorgho comme CIVE d'été. Les agriculteurs cherchent à maximiser les rendements des CIVE, afin que ces dernières assurent une part importante de l'alimentation du méthaniseur limitant ainsi le recours aux co-produits agro-industriels, aux biodéchets alimentaires et aux cultures dédiées. Les rendements obtenus sont de l'ordre de 10 tonnes de matière sèche (tMS)/ha pour l'orge d'hiver, et de 6 tMS/ha pour le maïs, avec une grande amplitude selon les conditions climatiques (de 0 à 12 tMS/ha). De ce fait, par rapport à un couvert classique, les CIVE sont conduites de manière assez intensive, avec notamment une fertilisation et une protection phytosanitaire plus importantes. Ces dernières sont pour autant moindres que celles des cultures principales, en

raison d'objectifs de rendement plus faibles liés à un cycle cultural plus court.

Pour l'implantation du maïs en CIVE d'été, les agriculteurs ont fréquemment recours au *strip-till*, technique qui consiste à travailler le sol sur la ligne de semis seulement, afin de conserver un maximum d'humidité. De plus, la moitié des agriculteurs enquêtés irriguent les CIVE d'été en cas de besoin, alors que les CIVE d'hiver ne le sont jamais. Dans la grande majorité des cas, les systèmes d'irrigation préexistaient à la méthanisation, et leur vocation première est toujours d'alimenter des cultures industrielles (légumes, pommes de terre). Lorsqu'ils sont utilisés pour les CIVE d'été, c'est pour en sécuriser l'approvisionnement en eau et les quantités apportées sont limitées (1 à 3 tours d'eau de 30 mm chacun).

Les méthaniseurs produisent entre 10 000 et 27 000 m³ de digestat par an. Dans la majorité des cas enquêtés, le digestat est épandu brut sur 25 à 75 % de la SAU chaque année, avec une moyenne de 60 % environ. L'épandage se fait principalement sur céréales d'hiver (CIVE ou cultures principales) et il remplace la plupart du temps le deuxième apport d'engrais azoté en sortie d'hiver. L'objectif est de maximiser la valorisation de l'azote, en apportant le digestat à une période où la céréale est en demande. Les conditions climatiques de fin d'hiver permettent de minimiser les

pertes par volatilisation de l'ammoniac, et ce d'autant plus que l'épandage se fait quasi systématiquement avec un pendillard. En cas de capacité de stockage du digestat inférieure à un an, il peut également être épandu avant ou sur les CIPAN restantes en fin d'été.

2- Des digestats aux propriétés fertilisantes et amendantes variables

Les digestats des onze méthaniseurs enquêtés ont été analysés afin de déterminer leurs caractéristiques physico-chimiques et leurs dynamiques de minéralisation. Il s'agissait en général de digestats bruts. Deux méthaniseurs étant équipés de séparateurs de phases, deux digestats solides et deux digestats liquides ont également pu être étudiés.

Les analyses montrent que les digestats bruts et liquides sont assez similaires, avec des teneurs en matière sèche, carbone organique, azote minéral (ammoniacal), organique et total proches de celles d'un lisier de porcs. Quant aux digestats solides, ils sont proches d'un fumier bovin, avec de plus fortes teneurs en matière sèche et en carbone organique. Les teneurs en azote total sont du même ordre que pour les digestats bruts et liquides, mais cet azote est principalement de nature organique. Il n'a pas été constaté d'influence significative du type d'intrants sur les caractéristiques des digestats. Les teneurs en azote (total et minéral) et en phosphore sont cependant assez variables, en fonction du type de digestat et au sein d'un même type (tableau 1). Cette variabilité plaide pour la réalisation d'analyses de digestat systématiques, les plus proches possibles de la date d'épandage, afin de s'assurer des quantités précises d'éléments fertilisants apportées.

Seule une fraction de l'azote contenue dans les digestats est effectivement disponible pour les plantes : l'azote ammoniacal d'une part, et celui issu de la minéralisation de l'azote organique d'autre part. Pour estimer la quantité d'azote disponible dans les différents digestats, la vitesse de minéralisation de l'azote organique qu'ils contiennent a été analysée en laboratoire (tableau 1).

Tableau 1 - Apport moyen (et écart-type) pour des doses usuelles d'apport de digestats

Paramètres	Digestat brut 40 m ³ /ha	Digestat liquide 40 m ³ /ha	Digestat solide 10 t/ha
N total (kg/ha)	199 (38)	223 (47)	52 (4)
N organique (kg/ha)	85 (15)	81 (22)	48 (4)
N ammoniacal (kg/ha)	113 (35)	141 (24)	4 (2)
N disponible (kg/ha) ¹	120 (29)	157 (25)	3 (2)
P ₂ O ₅ (kg/ha)	55 (24)	76 (68)	59 (1)
K ₂ O (kg/ha)	162 (26)	174 (27)	46 (12)

1. N ammoniacal + N organique × % N organique minéralisé après 90 jours d'incubation

Source : rapport final, page 35

Il a ainsi été estimé qu'un apport de 40 m³/ha de digestat brut (dose usuelle constatée sur le terrain) correspondait en moyenne à 120 kg/ha d'azote disponible, soit 113 kg N ammoniacal/ha et seulement 7 kg N/ha issus de la minéralisation au cours de l'année, sur un total de 85 kg d'azote organique/ha. Pour le digestat solide, la proportion d'azote sous forme ammoniacale est très faible, et la minéralisation nulle voire négative.

Si les digestats bruts et liquides peuvent être utilisés comme des fertilisants azotés, le digestat solide s'apparente davantage à un amendement. Par ailleurs, compte tenu de la très faible minéralisation de l'azote organique, on peut considérer que l'azote disponible pour la plante est assimilable à l'azote ammoniacal du digestat. Il convient donc de veiller à limiter sa volatilisation au champ pendant et après l'apport, afin de conserver les propriétés fertilisantes du digestat et éviter des émissions.

Les analyses physico-chimiques ont également permis d'évaluer la contribution des digestats à la matière organique des sols. Des différences s'observent selon la nature des digestats, tant du point de vue de leur quantité de carbone organique que de la stabilité de la matière organique.

Ainsi, le carbone organique ne représente que 1,8 % de la matière brute des digestats liquides et 2,1 % de celle des digestats bruts, contre 8,9 % pour le digestat solide. Des mesures des indices de stabilité de la matière organique (ISMO) ont également été réalisées. Cet indice représente la part de matière organique du digestat non minéralisée une année après l'épandage, et qui contribue donc au maintien de la matière organique du sol. Cet indice, pour les digestats étudiés, est du même ordre de grandeur que pour les fumiers ou lisiers. À dose de carbone apportée identique, la contribution des digestats à la matière organique du sol est donc similaire à celle des autres effluents d'élevage plus fréquemment employés.

Les apports de carbone humifié (carbone sous forme d'humus stable, qui contribue directement à la matière organique du sol) avec digestat brut et liquide sont faibles, du fait de la faible teneur en carbone, sans être négligeables. Ils sont du même ordre que pour des apports de lisier porcin. Cet apport de carbone humifié est un peu plus élevé dans le cas de digestats solides, même s'il reste bien inférieur à celui observé dans le cas d'épandage de fumiers bovins, notamment du fait de doses usuelles d'apport plus faibles.

Toutes ces analyses ont permis de préciser les caractéristiques des digestats issus de CIVE. Elles montrent, de façon globale, qu'ils ne sont pas très différents de ceux issus d'exploitations d'élevage.

Encadré 1 - Les outils PROLEG et PerfAgroP3®

PROLEG combine le modèle AMG⁴ (qui permet d'évaluer le stockage de carbone des sols cultivés) et le modèle STICS⁵, qui estime les fournitures d'azote à la plante et les pertes d'azote du système (NO₃, N₂O, NH₃). L'outil intègre également différentes équations bilan et bases de données qui permettent de calculer des bilans de gaz à effet de serre à l'échelle de la parcelle, des bilans de la contamination du sol en métaux ou encore des indicateurs de fertilité du sol. Pour la présente étude, les auteurs ont modélisé un scénario moyen avant méthanisation, et un après. Puis ils ont fait varier certains paramètres de ces scénarios (période d'apport du digestat par exemple), afin de rendre compte de la variabilité des pratiques observées sur le terrain.

PerfAgroP3® est un outil d'aide à la décision en agriculture qui identifie les caractéristiques de fonctionnement d'un système de production agricole permettant d'optimiser une performance. Les différentes performances calculées sont : le résultat économique, les émissions de GES, les consommations d'énergie non renouvelable, le potentiel nourricier et les émissions d'ammoniac. Le modèle actuel permet de représenter tout type d'exploitation agricole comprenant des cultures et/ou des élevages de bovins et/ou porcin, ainsi qu'un atelier de méthanisation. Là encore, les auteurs ont ensuite fait varier certains paramètres, pour rendre compte de la diversité des pratiques rencontrées (modes de production des CIVE ou d'approvisionnement du méthaniseur).

3 - Des impacts contrastés mais une performance globale stable au niveau de la parcelle et de l'exploitation

Pour évaluer les impacts agronomiques et environnementaux de la méthanisation agricole sans élevage, dans le contexte francilien, les auteurs ont utilisé deux modèles : PROLEG⁶, qui permet de calculer plusieurs indicateurs et bilans environnementaux à l'échelle de la parcelle ; PerfAgroP3®, qui réalise les bilans environnementaux et alimentaires à l'échelle des systèmes de production (encadré 1).

Ces simulations montrent plusieurs effets positifs de la méthanisation agricole sans élevage. D'abord, la production totale de biomasse à l'échelle de la parcelle tend à augmenter avec la méthanisation, du fait de la double récolte annuelle (CIVE et culture principale), sur une partie au moins des parcelles de l'exploitation. Une légère augmentation du stockage de carbone dans les sols est également observée. Ceci résulte de l'apport de carbone exogène, de la restitution au sol d'une partie du carbone contenu dans la partie récoltée des CIVE *via* le digestat, et enfin de la restitution au champ du carbone présent dans les résidus et racines de CIVE. Des économies d'engrais azotés, phosphorés et potassiques sont par ailleurs mises en évidence, à l'échelle de la parcelle et de la ferme, en raison de la substitution du digestat à une partie des engrais minéraux, et le bilan énergétique est amélioré à l'échelle de la ferme. Concernant les gaz à effet de serre (GES), la méthanisation permet une diminution des émissions de GES associées à l'activité agricole (jusqu'à -30 %), principalement en raison de la réduction des apports d'engrais minéraux. Toutefois, l'ensemble « exploitation agricole + méthaniseur »

émet, d'après les simulations, 23 à 66 % de GES en plus qu'une exploitation agricole seule, ce qui représente 467 à 1 325 t-eq. CO₂/an. Ce bilan est à mettre en regard de la réduction d'émissions de carbone fossile permise par la substitution de biogaz au gaz naturel (environ 2 000 t-éq CO₂/an).

En contrepoint, des effets négatifs ont également été mis en exergue. Ainsi, la volatilisation ammoniacale augmente avec la méthanisation, à l'échelle de la parcelle et à l'échelle de l'exploitation. Il convient donc de la maîtriser le mieux possible, en favorisant les périodes d'épandage les moins sensibles. Une diminution potentielle de la recharge en eau des nappes est également à signaler, la succession de CIVE et de cultures principales augmentant les besoins hydriques. Si les exploitations avec méthaniseurs sont irriguées, les réserves en eau peuvent être sur-sollicitées. La méthanisation peut aussi s'accompagner d'une baisse de la production de biomasse alimentaire, à l'échelle de la parcelle, et du potentiel alimentaire à l'échelle de l'exploitation, en raison de la modification des assolements et de la baisse du rendement des cultures alimentaires qui suivent les CIVE d'hiver. En effet, la présence de CIVE en hiver impose un semis tardif des cultures de printemps, ce qui pénalise la production. L'étude suggère un impact négatif de la méthanisation sur

4. Clivot H. *et al.*, 2019, « Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model », *Environmental Modelling & Software*.

5. Brisson N. *et al.*, 2008, « An overview of the crop model STICS », *European Journal of Agronomy*.

6. Levasseur F., Houot S., 2016, *Quel outil pour développer des systèmes de culture plus durables grâce à l'optimisation du recyclage des produits résiduels organiques et l'insertion des légumineuses ?*, École chercheurs PSDR 4, UMR ECOSYS, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay.

Tableau 2 - Synthèse des effets modélisés de la méthanisation sans élevage

Indicateur	Échelle	Tendance d'évolution
Production de biomasse totale Couverture des sols Bilan P et K	Parcelle et ferme	Augmentation ↗
Stockage de carbone	Parcelle	Augmentation ↗
Lixiviation de nitrates	Parcelle	Stable à diminution ↘
Bilan énergétique	Ferme	Augmentation ↗
Bilan GES	Ferme	Variable suivant la méthode de calcul retenue
Drainage et recharge en eau des nappes	Parcelle	Diminution ↘
Volatilisation ammoniacale	Parcelle et ferme	Augmentation ↗
Pression phytosanitaire	Parcelle et ferme	Incertaine
Potentiel nourricier	Parcelle et ferme	Diminution ↘

Source : auteurs

l'usage de produits phytosanitaires. En effet, l'Indice de fréquence de traitement (IFT) augmente légèrement à l'échelle de la parcelle. Toutefois, il pourrait baisser à l'échelle de l'exploitation, sous réserve d'un assolement optimisé d'un point de vue économique. Des incertitudes fortes existent néanmoins sur ce résultat, en particulier sur les hypothèses prises en compte. Un autre levier pour diminuer l'IFT global serait de réduire la protection des CIVE, mais cette piste nécessite des approfondissements avec d'autres outils et des essais agronomiques. Pour d'autres indicateurs, l'impact de la méthanisation est neutre (lixiviation de nitrates par exemple) ou incertain. L'ensemble des effets cités sont récapitulés dans le tableau 2.

L'ampleur des effets dépend des quantités de digestat épandues et de la part des CIVE dans l'assolement. Plus les quantités épandues sont importantes, plus les économies d'engrais, le stockage de carbone, mais aussi la volatilisation de l'azote sous forme ammoniacale sont importants. L'augmentation de la proportion de CIVE dans les assolements diminue quant à elle les économies d'engrais, la recharge en eau des nappes et la diversité des assolements, et augmente la pression phytosanitaire, mais également la production de biomasse et le stockage de carbone.

Ces résultats concordent avec les constats faits dans la littérature scientifique. Ils précisent les impacts de la méthanisation dans le contexte spécifique d'une agriculture sans élevage. L'étude montre la possibilité de produire du biogaz dans des systèmes de

production agricole sans élevage, avec la possibilité de maintenir les performances agronomiques et environnementales globales, aussi bien à l'échelle de la parcelle que de l'exploitation. Par ailleurs, les effets négatifs peuvent, pour certains, être atténués par la mise en œuvre de pratiques optimisées.

*

Cette étude témoigne de la grande homogénéité des systèmes de culture et de production, liés aux méthaniseurs agricoles sans élevage franciliens en fonctionnement en 2021. Les analyses de digestats précisent les propriétés de ces derniers et donnent des clefs pour leur meilleure gestion. À l'échelle de la parcelle et de l'exploitation, les simulations permettent d'évaluer les impacts agronomiques et environnementaux des systèmes de culture et de production liés à la méthanisation agricole sans élevage.

Ce travail apporte aussi un éclairage nouveau sur la réalité du terrain, et sur les connaissances et références qui manquent aujourd'hui aux agriculteurs concernés pour conduire leur unité de méthanisation et leur exploitation de façon optimale. C'est pourquoi un recueil de recommandations a été élaboré, à partir des conclusions de l'étude, à destination des agriculteurs, des conseillers et des acteurs institutionnels. Il souligne notamment l'importance de s'accorder sur le statut et les objectifs des CIVE (cultures à vocation principale de production de biomasse ou couvert multi-services), ce qui implique des choix de CIVE et des conduites culturelles

différentes (fertilisation, protection phytosanitaire, etc.). Dans tous les cas, des expérimentations supplémentaires sont nécessaires afin de définir des références pour la fertilisation des CIVE, ainsi que les seuils de déclenchement éventuel d'une protection phytosanitaire de ces cultures. La question de l'irrigation des CIVE d'été, ou des cultures suivant les CIVE d'hiver, doit également faire l'objet d'une réflexion qui tienne compte des ressources en eau disponibles, notamment dans un contexte de changement climatique. Enfin, des interrogations subsistent aussi sur l'effet de la méthanisation sans élevage sur la biodiversité.

Sophie Carton
AgroParisTech

Florent Levavasseur
Inrae, UMR ECOSYS

Mickaël Hugonnet
Centre d'études et de prospective

Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire
Secrétariat Général

Service de la statistique et de la prospective
Centre d'études et de prospective

3 rue Barbet de Jouy
75349 PARIS 07 SP

Sites Internet : www.agreste.agriculture.gouv.fr
www.agriculture.gouv.fr

Directrice de la publication : Corinne Prost

Rédacteur en chef : Bruno Héralt
Mel : bruno.herault@agriculture.gouv.fr
Tél. : 01 49 55 85 75

Composition : DESK (www.desk53.com.fr)
Dépôt légal : À parution © 2022